

## ПЕРЕПРИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ РЕГЛАМЕНТНИХ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК У ПОЗАПРОЕКТНИЙ ПЕРІОД ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*В.І. Скалозубов, І.Л. Козлов, О.О. Чулкін*

*Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна*

*E-mail: vi.skalozubov@gmail.com, тел. 096-562-96-34;*

*kozlov.i.l@onu.ua, тел. 067-480-56-60;*

*zpo.onpu@gmail.com, тел. 067-486-51-45*

При подовженні експлуатації теплотехнічного обладнання систем безпеки ядерних енергетичних установок необхідно переглянути періодичність планових випробувань шляхом їх оптимізації з урахуванням залишкового ресурсу обладнання. З одного боку, необхідно збільшувати частоту випробувань для виявлення «прихованих» відмов, а з іншого боку, часті випробування призводять до передчасного зносу устаткування. Запропоновано оригінальний метод оптимізації періодичності випробувань теплотехнічного обладнання систем безпеки ядерних енергетичних установок. У запропонованому методі критерій оптимізації – неперевикнення імовірності відмови системи безпеки в позапроектний період експлуатації по відношенню до імовірності відмови за залишковим ресурсом обладнання за проектний період експлуатації. В результаті застосування розробленого методу при подовженні експлуатації систем безпеки ядерних енергетичних установок з серійними реакторами типу ВВЕР-1000 встановлено, що оптимальна періодичність випробувань у два рази менша проектної при подовженні терміну експлуатації на п'ять років та в три рази менша – при подовженні на 10 років.

### ВСТУП

Системи безпеки ядерних енергетичних установок (СБ ЯЕУ) експлуатуються в режимі готовності виконання призначених функцій безпеки в разі виникнення аварійних ситуацій.

Для підтвердження готовності надійного виконання функцій безпеки проектом та технологічним регламентом безпечної експлуатації ЯЕУ передбачені періодичні випробування СБ як при роботі реактора на потужності, так і в період планових ремонтів енергоблоків ЯЕУ [1, 2].

Однак регламентована проектом періодичність планових випробувань СБ визначена без достатніх обґрунтувань, ґрунтуючись в основному на інтуїтивних підходах. Встановлення планової періодичності випробувань повинно бути оптимальним: з одного боку, необхідно частіше проводити випробування для виявлення «прихованих» відмов і/або дефектів, а з іншого боку, надмірно часті випробування призводять до передчасного зносу устаткування СБ та відповідного зниження надійності виконання функцій безпеки.

Аналітичний огляд відомих досліджень з оптимізації планування випробувань, технічного обслуговування та ремонту систем, важливих для безпеки, у проектний період експлуатації ЯЕУ наведено в [1, 3].

Особливості оптимізації періодичності випробувань СБ при подовженні експлуатації ЯЕУ полягають у наступному [4]:

1. Більшість обладнання виробило призначений проектом ресурс експлуатації, тому заходами з подовження експлуатації передбачені обстеження технічного стану обладнання та проведення оцінки залишкового ресурсу за визначальними параметрами технічного стану.

2. За період експлуатації накопичено значний досвід з оцінки ефективності проектної періодичності випробувань СБ України. Зокрема, для українських енергоблоків з реакторами типу ВВЕР встановлена висока надійність СБ та неефективність більшості їх випробувань.

Таким чином, питання оптимізації періодичності випробувань СБ при подовженні експлуатації ЯЕУ актуальні та є предметом досліджень даної роботи.

### ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ВИПРОБУВАНЬ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ПРИ ПОДОВЖЕННІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

1. Критерієм (умовою) оптимізації приймається неперевикнення імовірності відмови СБ у позапроектний період експлуатації  $P_1$ , викликаной процесами деградації/старіння в режимах готовності виконання призначених функцій безпеки та процесами зношення при випробуваннях теплотехнічного обладнання, імовірності відмови за залишковим ресурсом за проектний термін експлуатації  $P_0$ :

$$P_1 < P_0. \quad (1)$$

2. За параметр оптимізації приймається періодичність (частота) планових випробувань СБ при роботі реактора на потужності  $f_1$ , що задовольняє умові оптимізації (1).

3. Імовірність відмови за залишковим ресурсом за проектний термін експлуатації визначається відношенням кількості циклів навантаження на обладнання СБ за проектний період експлуатації  $N_0$  до допустимої кількості циклів навантаження за проектом та технологічним регламентом безпечної експлуатації ЯЕУ  $N_d$  [5]:

$$P_0 = \frac{N_0}{N_d} \quad (2)$$

Для СБ, що перебувають у режимі готовності виконання призначених функцій безпеки, кількість циклів навантаження на обладнання визначається періодичністю планових випробувань  $f_0$  за проектний період експлуатації  $T_0$ :

$$N_0 = f_0 T_0 \quad (3)$$

4. Імовірність відмови СБ у позапроектний період експлуатації, встановленої тривалістю  $T_1$ , що викликана процесами старіння/деградації та зношення при випробуваннях обладнання, можна визначити як

$$P_1 = \int_0^{T_1} \lambda dt + P_c f_1 T_1, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – імовірність виникнення відмови в одиницю часу через старіння/деградацію теплотехнічного обладнання СБ;  $P_c$  – імовірність відмови через знос при одиничному випробуванні СБ;  $f_1$  – періодичність випробувань у позапроектний період експлуатації тривалістю  $T_1$  (параметр оптимізації).

З урахуванням виражень (2)–(4) умова оптимізації (1) має такий вигляд:

$$\frac{f_1}{f_0} < \frac{1}{P_c N_d} \frac{T_0}{T_1} - \frac{1}{P_c f_1 T_1} \int_0^{T_1} \lambda dt \quad (5)$$

Область визначення параметра оптимізації:

$$0 \leq \frac{f_1}{f_0} \leq 1. \quad (6)$$

Планова періодичність випробувань у проектний період експлуатації  $f_0$  та допустима кількість циклів навантаження  $N_d$  визначаються технологічним регламентом безпечної експлуатації ЯЕУ (наприклад, [2]).

Призначений термін подовження експлуатації  $T_1$ , імовірності відмов теплотехнічного обладнання  $P_c$  та  $\lambda$  визначаються за результатами аналізу досвіду експлуатації (у тому числі і аналогічного обладнання), а також проектно-конструкторської документації на елементи СБ (наприклад, [6]).

## АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ

Результати розрахунків областей оптимальних значень періодичності випробувань теплотехнічного обладнання СБ при варіюванні термінів подовження експлуатації (від 1 до 30 р.) і показників надійності наведені на рисунку.

Для визначення імовірності відмови з причин старіння/деградації теплотехнічного обладнання  $\lambda$  було прийнято традиційне експоненціальне розподілення, цілком обґрунтоване для теплотехнічного та енергетичного обладнання [1–4].

З наданих на рисунку результатів випливає:

1. Збільшення тривалості строків подовження експлуатації при певних показниках надійності обладнання призводить до зниження оптимальних

значень періодичності випробувань СБ у позапроектний період.

2. Збільшення надійності (або зменшення імовірності відмов з різних причин) призводить до розширення областей оптимальних значень періодичності випробувань.

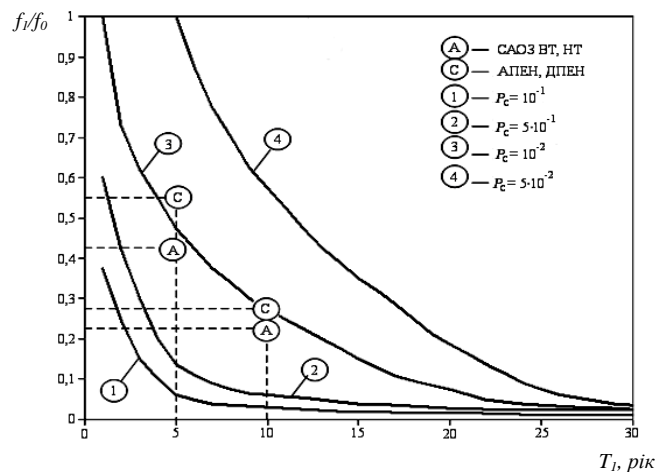
3. При імовірності відмови через знос при випробуваннях менше  $10^{-3}$  доцільне збереження проектної періодичності випробувань СБ України.

Розроблений метод був застосований при подовженні експлуатації ЯЕУ серійних енергоблоків з ВВЕР-1000/В-320 (1-й та 2-й блоки Запорізької АЕС) для оптимізації періодичності випробувань натурних СБ:

системи аварійного охолодження активної зони реактора насосами низького тиску (САОЗ НТ);

системи аварійного охолодження активної зони реактора насосами високого тиску (САОЗ ВТ);

системи аварійного та допоміжного підживлення парогенератора енергетичними насосами (АПЕН, ДПЕН).



Розрахункові області оптимізації періодичності випробувань систем безпеки при подовженні експлуатації

Проектом ВВЕР-1000/В-320 передбачено триканальне дублювання кожної системи: САОЗ ВТ, САОЗ НТ, АПЕН та ДПЕН. При цьому кожен канал достатній для виконання призначених функцій безпеки.

До складу кожного каналу зазначених СБ входить наступне теплотехнічне обладнання: насос, запірно-регулююча арматура, теплообмінники.

Консервативно показники надійності визначалися за найменш надійним елементом каналу СБ – насосів. Імовірності відмов насосів визначалися за результатами аналізу досвіду їх експлуатації (технічних паспортів), за статистичними даними по аналогічному обладнанню із розділу «Системний аналіз», зі звітів з аналізу безпеки серійних енергоблоків з ВВЕР-1000/В-320.

Встановлена регламентом проектна періодичність випробувань для кожного каналу СБ – один раз на місяць при роботі реактора на потужності.

Результати осереднених розрахункових обґрунтувань для САОЗ ВТ, САОЗ НТ, АПЕН та ДПЕН 1-го і 2-го енергоблоків Запорізької АЕС наведені на рисунку. З розрахунків видно, що оптимальна періодичність випробувань кожного каналу СБ при подовженні експлуатації на п'ять років складає одне випробування в два місяці (у два рази менше, ніж проектна періодичність), а при подовженні експлуатації на 10 років – одне випробування в три місяці (у три рази менше, ніж проектна періодичність випробувань).

### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. У разі подовження експлуатації теплотехнічного обладнання СБ ЯЕУ необхідно переглянути періодичність планових випробувань шляхом їх оптимізації з урахуванням залишкового ресурсу обладнання. З одного боку, необхідно збільшувати частоту випробувань для виявлення «прихованих» відмов, а з іншого боку, часті випробування призводять до передчасного зносу устаткування.

2. Запропоновано оригінальний метод оптимізації періодичності випробувань теплотехнічного обладнання СБ ЯЕУ.

У запропонованому методі критерій оптимізації – неперевикнення імовірності відмови СБ у позапроектний період експлуатації по відношенню до імовірності відмови за залишковим ресурсом обладнання за проектний період експлуатації.

3. Внаслідок застосування розробленого методу при подовженні експлуатації СБ ЯЕУ з серійними реакторами типу ВВЕР-1000 встановлено, що

оптимальна періодичність випробувань у два рази менша проектної при подовженні терміну експлуатації на п'ять років і в три рази менша – при подовженні на 10 років.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. В.И. Скалозубов, Д.В. Билей, Т.В. Габляя и др. *Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР*. Чернобыль: «Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины», 2008, 506 с.

2. 7-Э-УНИК. *Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №4 Ровенской АЭС с реактором ВВЭР-1000/В-320*. Киев: ГП НАЭК «Энергоатом».

3. Ю.Л. Коврижкин, Ю.А. Комаров, В.М. Пышный, В.И. Скалозубов, И.М. Фольтов. *Оптимизация планирования ремонтов и испытаний систем безопасности атомных электростанций на основе риск-ориентированных подходов*. Одесса: ТЭС, 2006, 383 с.

4. В.И. Скалозубов, А.А. Ключников, Е.С. Лещетная. *Основы продления эксплуатации АЭС с ВВЭР*. Чернобыль: «Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины», 2011, 384 с.

5. ПН АЭ Г-7-002-86. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*.

6. *Продление эксплуатации насосов систем, важных для безопасности, 1-го и 2-го энергоблоков Запорожской АЭС*: Отчет о НИОКР №629-14 ОП ГП НАЭК «Энергоатом», Запорожская АЭС.

*Статья поступила в редакцию 22.08.2017 г.*

## PERENAZNACHENIE PERIODICHNOSTI REGULYMENTNYKH ISPYTANIY SISTEM BEZOPASNOSTI YADERNYKH ENERGETICHESKIKH USTANOVOK V ZAPROEKTNIY PERIOD EKSPLUATACIIY

*В.И. Скалозубов, И.Л. Козлов, О.А. Чулкин*

При продлении эксплуатации теплотехнического оборудования систем безопасности ядерных энергетических установок необходимо пересмотреть периодичность плановых испытаний путем их оптимизации с учетом остаточного ресурса оборудования. С одной стороны, необходимо увеличивать частоту испытаний для выявления «скрытых» отказов, а с другой стороны, частые испытания приводят к преждевременному износу оборудования. Предложен оригинальный метод оптимизации периодичности испытаний теплотехнического оборудования систем безопасности ядерных энергетических установок. В предложенном методе критерий оптимизации – неперевышение вероятности отказа системы безопасности в запроектный период эксплуатации по отношению к вероятности отказа по остаточному ресурсу оборудования за проектный период эксплуатации. В результате применения разработанного метода при продлении эксплуатации систем безопасности ядерных энергетических установок с серийными реакторами типа ВВЭР-1000 установлено, что оптимальная периодичность испытаний в два раза меньше проектной при продлении срока эксплуатации на пять лет и в три раза меньше – при продлении на 10 лет.

## **REVISION OF NUCLEAR POWER PLANTS SAFETY SYSTEMS' ROUTINE TESTING ASSIGNED PERIODICITY DURING THE DESIGN EXTENTION PERIOD**

*V.I. Skalozubov, I.L. Kozlov, O.A. Chulkin*

When nuclear power plants safety systems' thermal equipment operation extending, a necessary requirement shall rely on revising the scheduled equipment tests frequency to optimize those tests schedule taking into account the equipment's remained lifespan. On the one hand, there exists a need for tests frequency increase to detect "hidden" failures, and on the another, frequent tests cause a premature wear of the equipment. Proposed is an original method for optimizing the frequency of NPPs safety systems' thermal engineering equipment testing. Essential in the proposed method is the optimization criterion chosen: index of security system failure probability non-exceedance during the beyond-design operating period as referred to the failure probability expected considering the equipment residual resource during the design operating period. The developed method implementation when applied to NPPs safety systems operated beyond the design service life at nuclear power plants with WWER-1000 series reactors, allowed to establish that the optimal tests frequency makes half the designed one when the equipment service life is extended by five years and three times less that the designed frequency when subject lifespan extended by 10 years.